

PAUL SCHERRER INSTITUT



Energy Systems Analysis

**ETH** zürich

# Energiesystemanalytische Sichtweisen auf Wasserstofftechnologien und -systeme


Prof. Dr. Russell McKenna, Labor für Energiesystemanalyse (LEA), PSI & Lehrstuhl für Energiesystemanalyse, ETH Zürich

PSI Energy Briefing 2024, 15<sup>th</sup> May 2024, Bern



# Agenda

1. Einführung
2. Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von Wasserstoff
3. Die Rolle von Wasserstoff in einer Netto-Null Schweiz
4. Fazit



1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit

# Agenda

1. Einführung
2. Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von Wasserstoff
3. Die Rolle von Wasserstoff in einer Netto-Null Schweiz
4. Fazit



1. Einführung

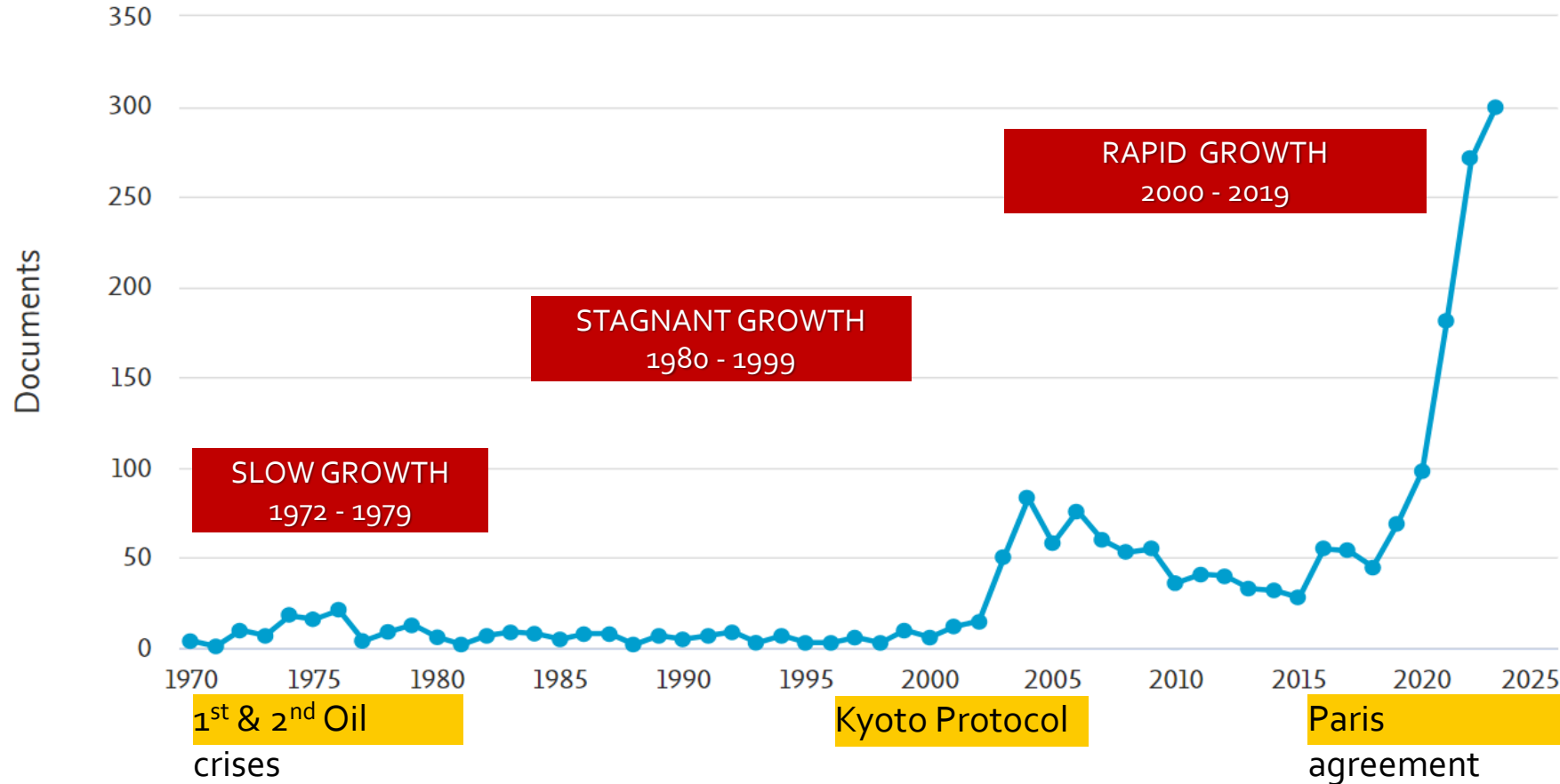
2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit

# In den letzten 50 Jahren...

Dokumente in Scopus\* mit Bezug auf Wasserstoff in Energiesystemen



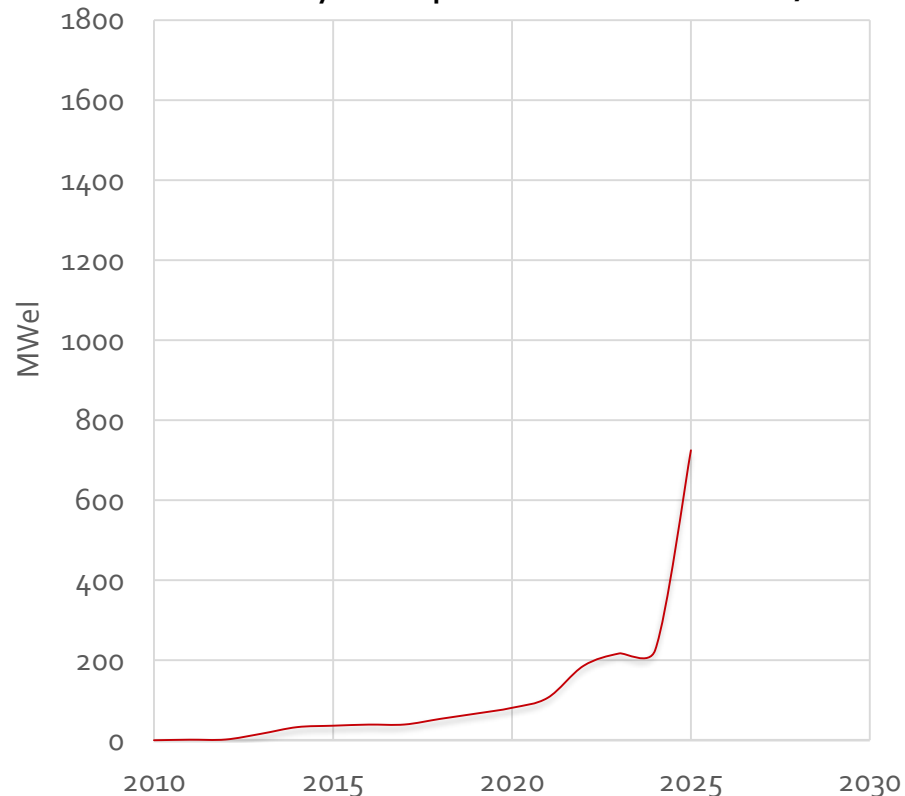
\* Scopus query: TITLE ( ( "Hydrogen" "Economy" ) OR ( "Hydrogen" "Society" ) OR ( "Hydrogen" "Roadmap" ) OR ( "Hydrogen" "Energy System" ) )

Adapted from : Yap & McLellan, 2023



# RePowerEU-Plan: Reduzierung der EU-Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen mit Fokus auf H<sub>2</sub>

In Betrieb und im Bau befindliche  
Elektrolysekapazität in der EU27



## RePowerEU Ziele:

2020-2024: 1 Mt H<sub>2</sub> aus Elektrolyse ~ 9 – 10 GW<sub>el</sub>\*

2025-2030: 10 Mt H<sub>2</sub> aus Elektrolyse ~90 – 100 GW<sub>el</sub>\*

\* Berechnet basierend auf 58-64% Ausnutzungsgrad, 50 kWh/kgH<sub>2</sub> Effizienz

## RePowerEU Herausforderung:

RePowerEU benötigt das 100-fache der heutigen Elektrolysekapazität

Falls Elektrolyse wie solar PV wächst: maximal 70 GW<sub>el</sub> bis 2030

## Stand in der Schweiz

Etwa 40 MW oder 6 ktH<sub>2</sub> Erzeugungskapazität in CH

Seit April Axpo/Rhiienergie Anlage Reichenau in Domat/Ems mit 2,5 MW

IEA, 2022

1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit

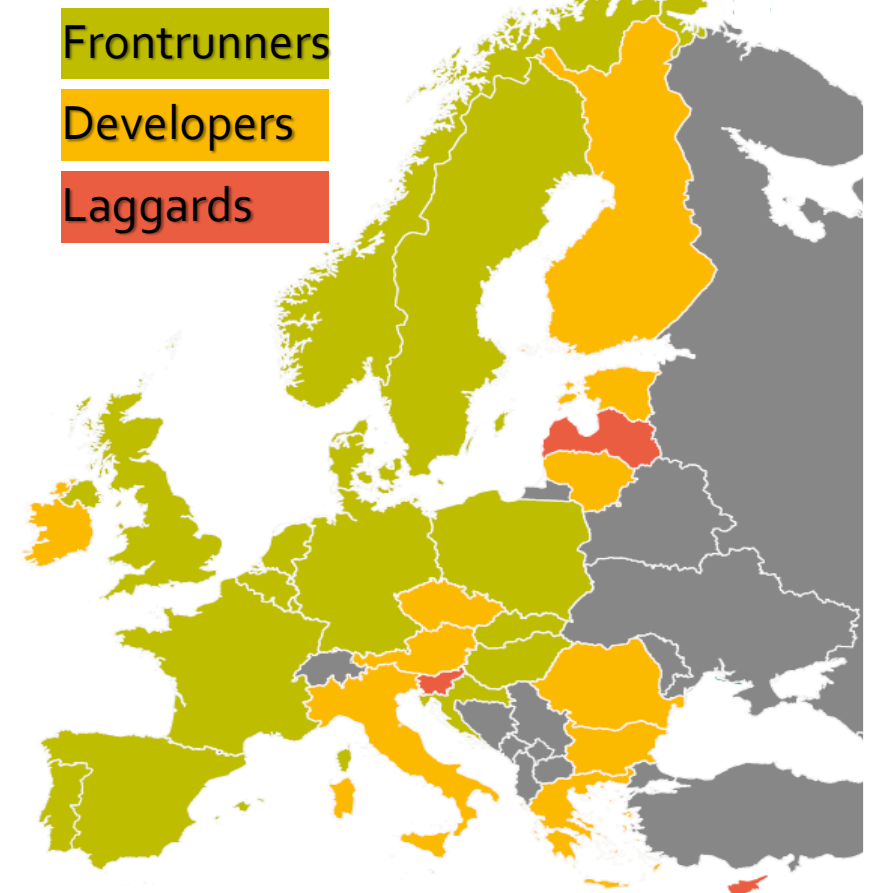
# Heutige Strategien verfehlen RePowerEU H2-Ziele (02/2022)

Angestrebte Elektrolysekapazitäten im Rahmen der H2-Strategie in europäischen Ländern bis 2030:

DE:	10 GW
DK:	4-6 GW
IT:	5 GW
SE:	5 GW
UK:	5 GW (v.a. CCS)
ES:	4 GW
NL:	3-4 GW
PL:	2 GW
BE:	150 MW
HU:	240 MW

**Total ohne UK: 36 GW**

## European Countries with H2-strategy



Source: Jacobs & Miccinilli, 2022

1. Einführung

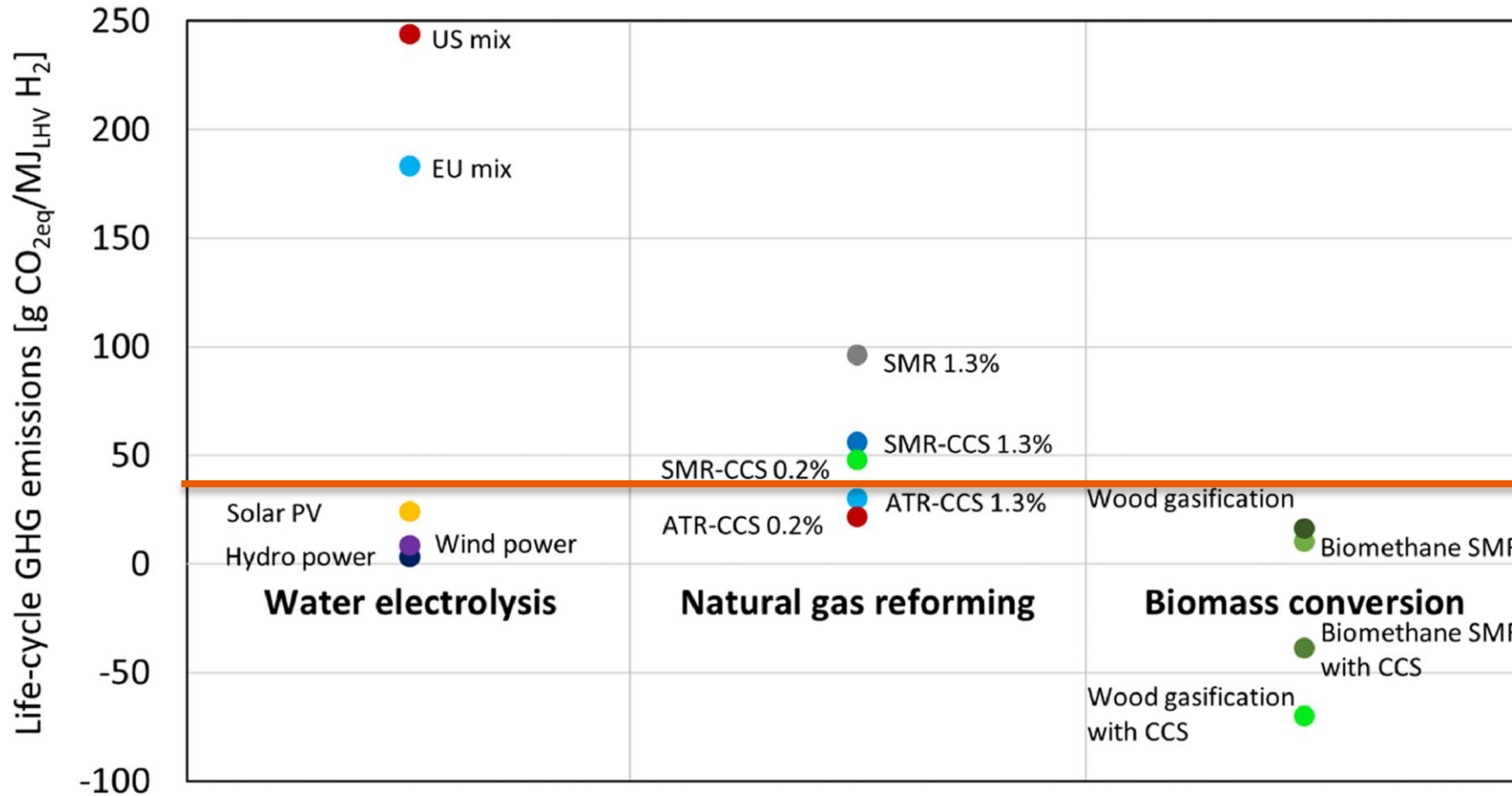
2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H2

4. Fazit

# Was ist kohlenstoffarmer Wasserstoff?

Life-cycle GHG emissions of hydrogen production GWP100



European CertifHy initiative low carbon threshold

**36.4 gCO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub>**

Source: Reigstad et al. 2022

1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit

# Agenda

1. Einführung
- 2. Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von Wasserstoff**
3. Die Rolle von Wasserstoff in einer Netto-Null Schweiz
4. Fazit



1. Einführung

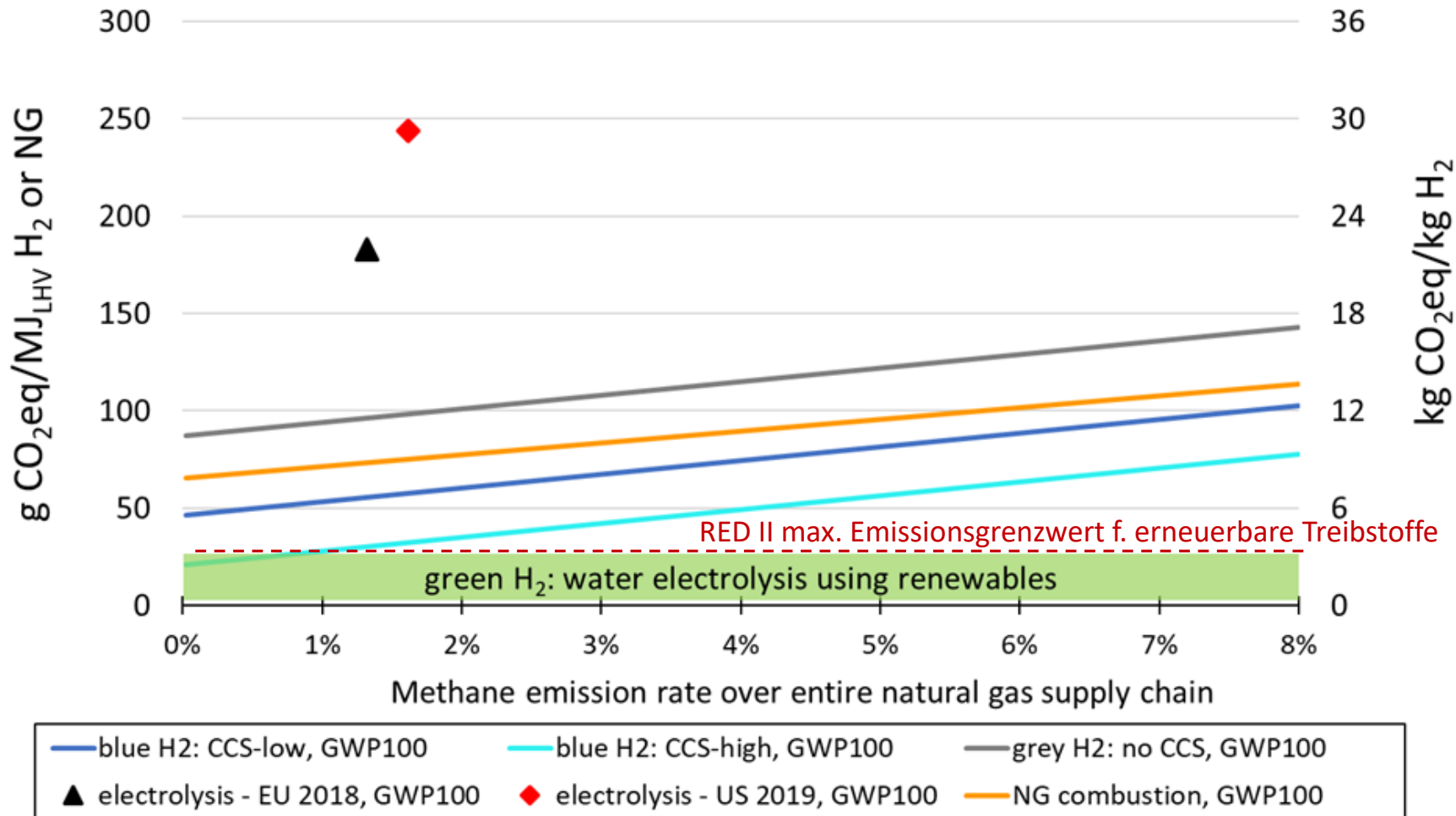
2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit



# Wasserstoff – Treibhausgasemissionen der Produktion



- “CCS-low”: SMR mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung nur am Reformer (gesamt ca. 55%)
- “CCS-high”: ATR mit effizienter CO<sub>2</sub>-Abscheidung (gesamt ca. 93%)

Blau ist klimafreundlich, falls:

- ✓ CH<sub>4</sub>-Emissionen aus Erdgasförderung und Transport gering sind
- ✓ CO<sub>2</sub>-Abscheidung hoch ist (>90%, “CCS-high”)

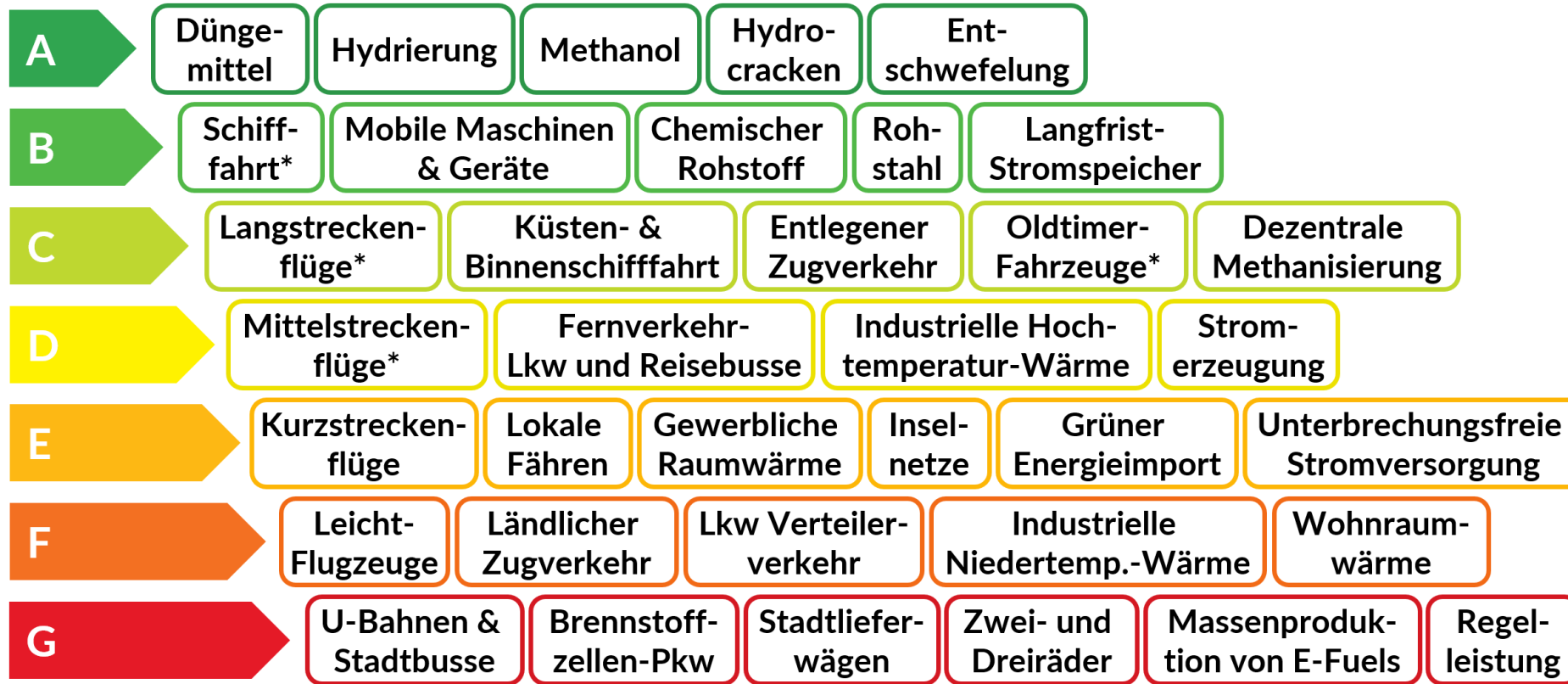
Grün ist klimafreundlich, falls:

- ✓ Strom mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen genutzt wird

Bauer, C., et al. (2022) On the climate impacts of blue hydrogen production. Sustainable Energy Fuels, doi: [10.1039/D1SE01508G](https://doi.org/10.1039/D1SE01508G)

# Wasserstoff: Prioritäten in der Nutzung

## Alternativlos



Nicht vorhanden  
Unattraktiv

Alternativen

Effizienter  
Günstiger

## Unwirtschaftlich

\* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Einsatzbereiche\\_sauberen\\_Wasserstoff.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Einsatzbereiche_sauberen_Wasserstoff.png)

© Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill & Martin Kittel, based on Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities & Paul Martin, CC-BY 4.0



# H<sub>2</sub>-basierte E-fuels: wegen niedriger Effizienz für manche Anwendungen nicht sinnvoll

## Electricity-to-useful energy efficiencies

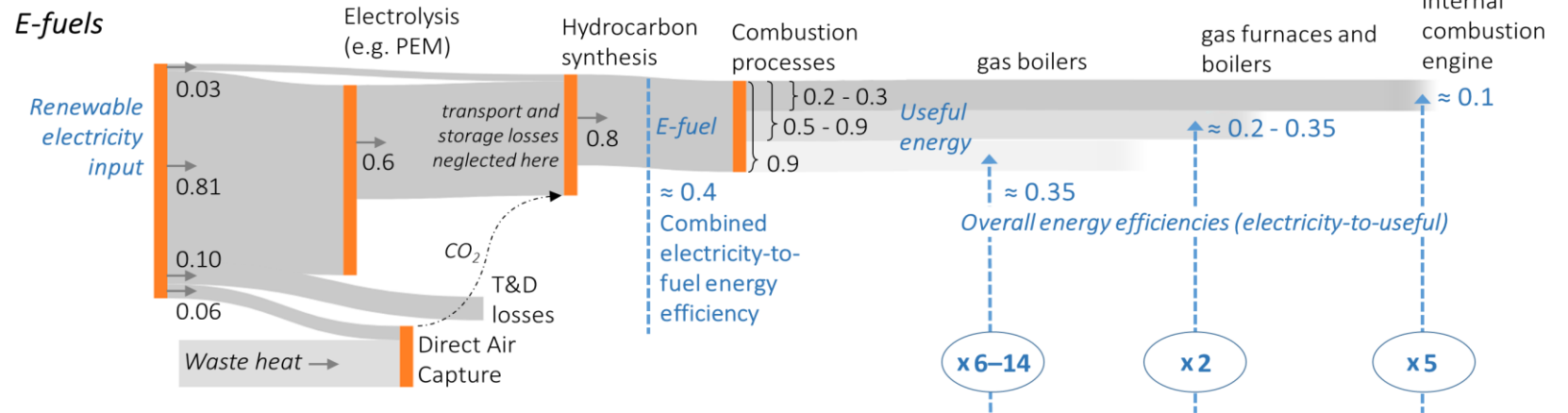
Black: individual efficiencies  
Blue: combined efficiencies

for different energy services and sectors

Low-temperature heat in industry and buildings, <100°C    High-temperature heat in industry, >100°C    Light-duty vehicles

E-fuels

E-fuels



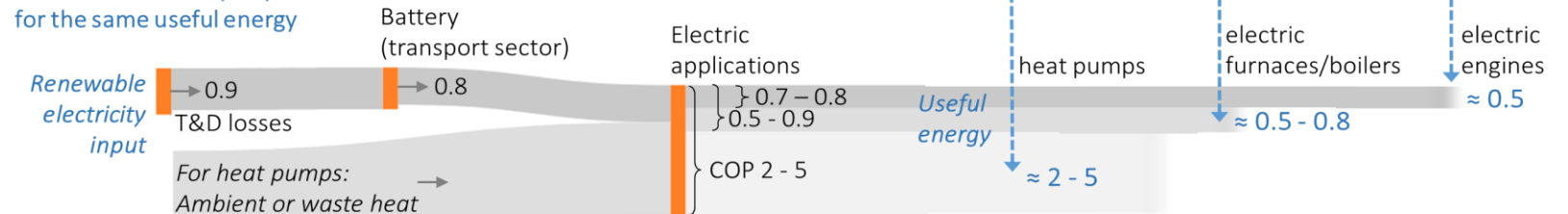
Mit E-fuels wird 2-14 mal mehr Strom verbraucht als mit direkter Elektrifizierung

Direkte Nutzung des Stroms

Direct electrification

Much less electricity required for the same useful energy

Much less electricity required for the same useful energy



Ueckerdt, F., et al. (2021) Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation.

1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit

# Wie klimafreundlich ist blauer H<sub>2</sub> heute und in naher Zukunft?

## Heute

- Äußerst begrenzte Produktion von H<sub>2</sub> durch Erdgasreformierung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung heute (< 1Mt H<sub>2</sub>/a; ca. 1% der weltweiten Wasserstoffproduktion)
- Grossteil des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> wird für „enhanced oil recovery“ (EOR) genutzt (USA, CA)
- CO<sub>2</sub>-Abscheideraten sind generell tief (<60%)
- Keine dieser Produktionsanlagen entspricht dem Konzept von „blauem Wasserstoff“ (d.h. einer zielgerichteten H<sub>2</sub>-Produktion mit geringen THG-Emissionen)

## Demnächst

- Viele Anlagen (ca. 100) in Planung\*, die dem Konzept von „blauem Wasserstoff“ entsprechen, mit ATR als dominierender Technologie und in Kombination mit geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherung (19 Mt H<sub>2</sub>/a)

\* Kategorisierung: „concept“, „feasibility study“, „final investment decision“

1. Einführung

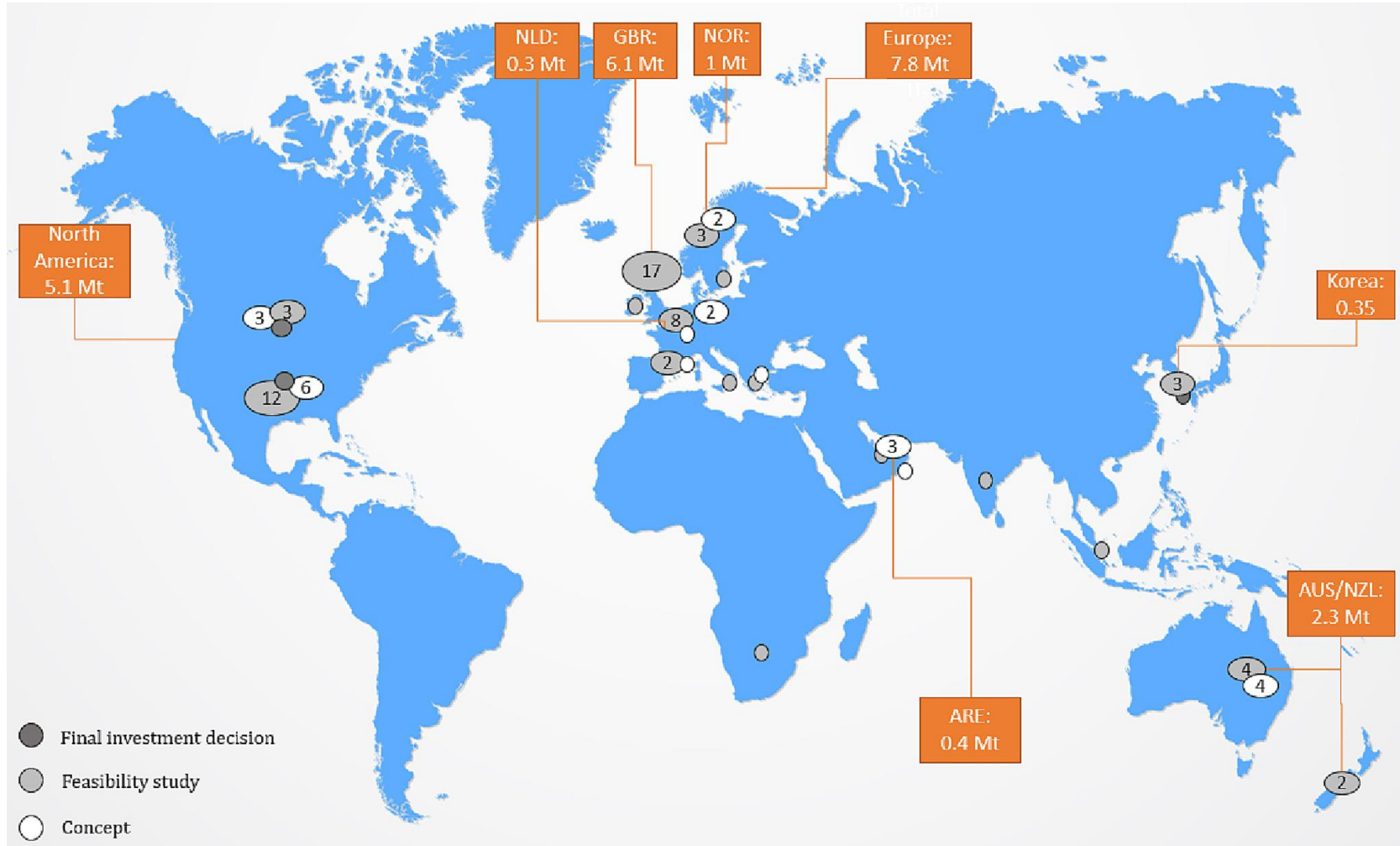
2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit



# Blauer Wasserstoff in naher Zukunft – Projekte in Planung



Riemer, M., Duscha, V. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121622>

1. Einführung

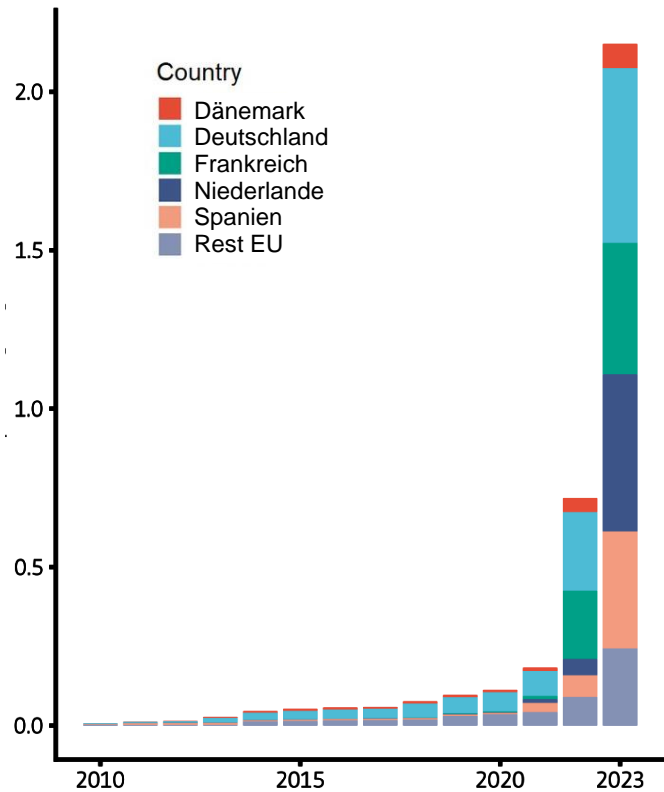
2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

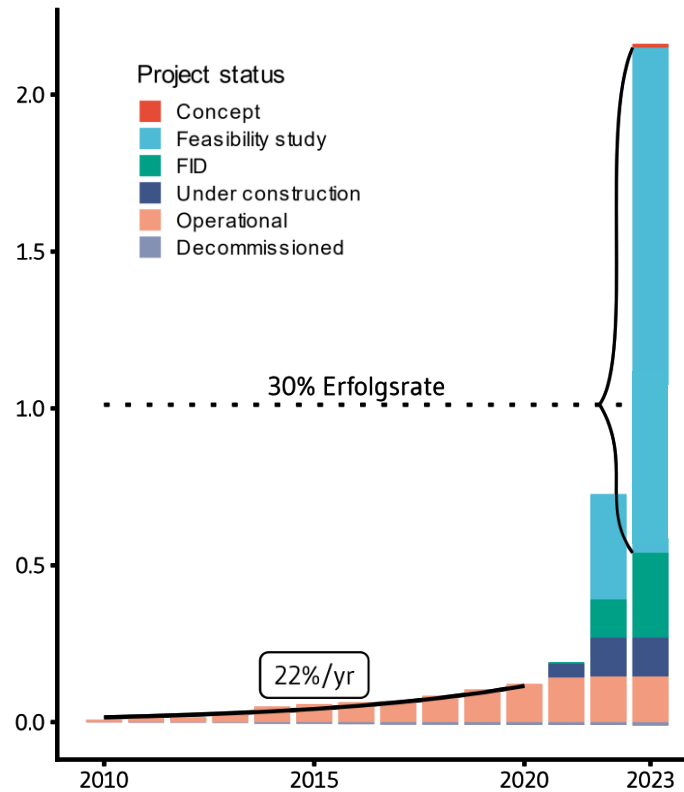
4. Fazit

# Grüner Wasserstoff: ebenfalls unsichere Verfügbarkeit

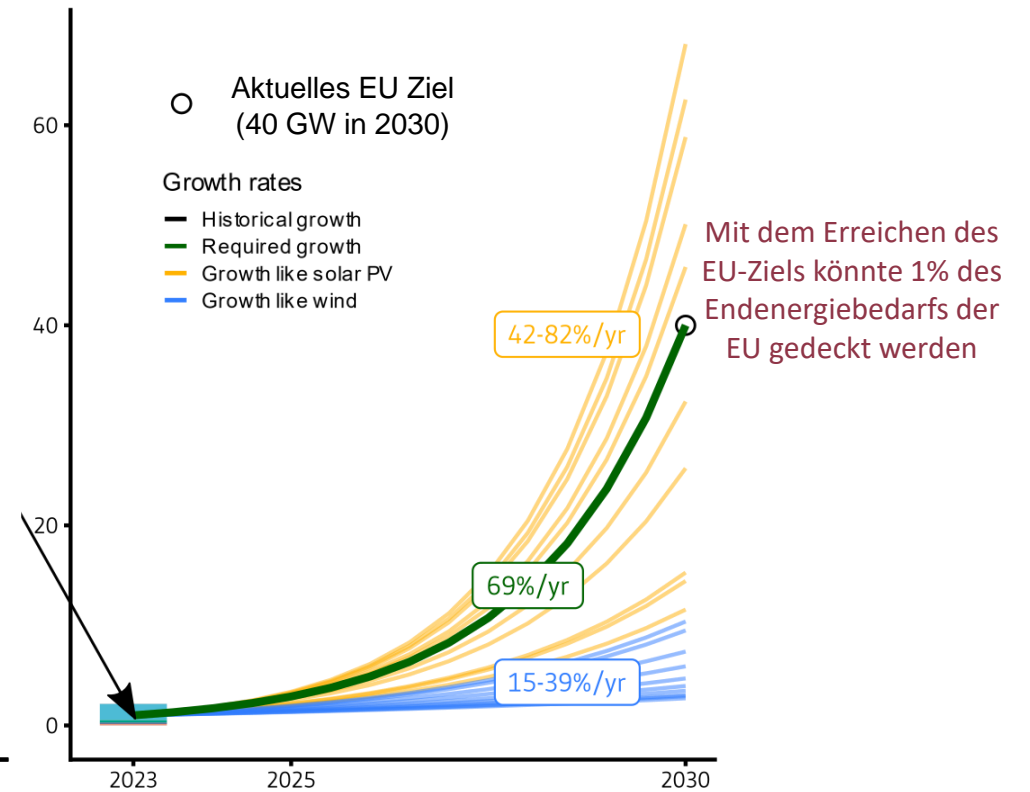
Elektrolyseleistung EU [GW] nach Land



Elektrolyseleistung EU [GW] nach Status



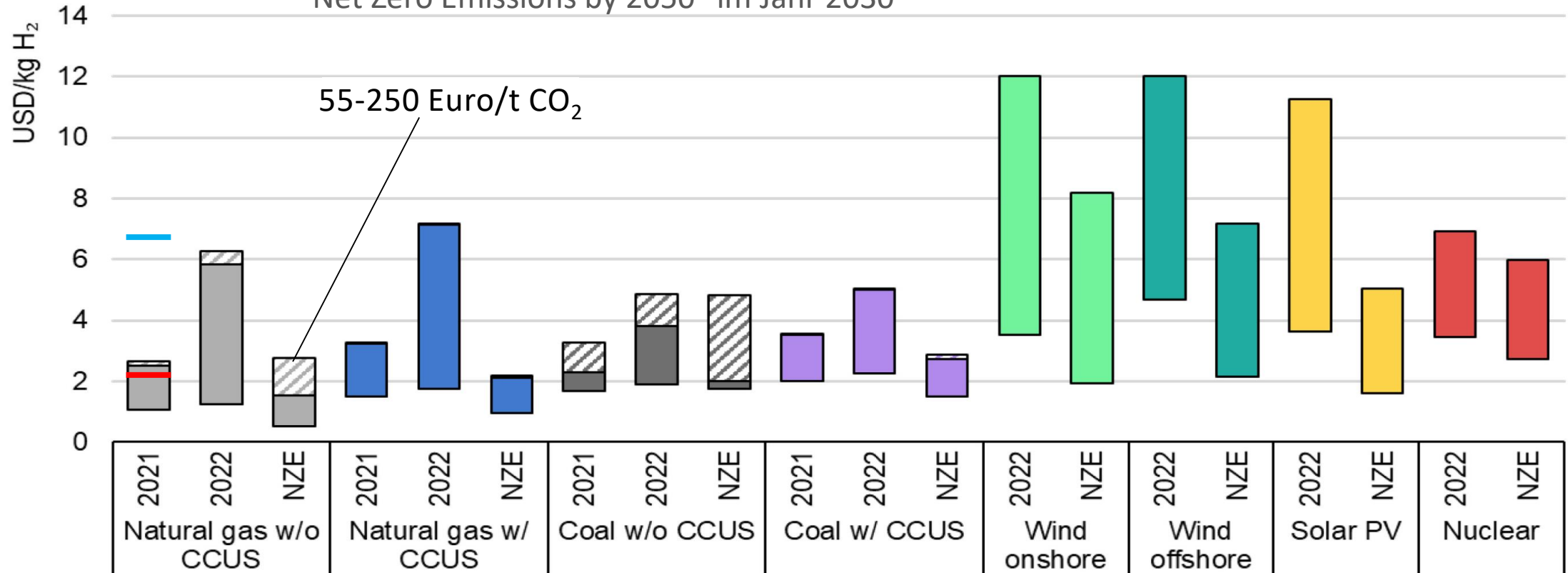
Erforderliche Wachstumsraten für das Ziel 40 GW Elektrolyseleistung



Ueckerdt, U., et al. (2021) Ariadne Kurzdossier, Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie.  
 Odenweller, A., et al. (2022) Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply.

# Wasserstoff – Erzeugungskosten

Wasserstoffgestehungskosten nach Technologie in den Jahren 2021, 2022 und im Szenario "Net Zero Emissions by 2050" im Jahr 2030



IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

Erdgas- — 15 Euro/MWh  
 preis — 100 Euro/MWh



# Agenda

1. Einführung
2. Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von Wasserstoff
- 3. Die Rolle von Wasserstoff in einer Netto-Null Schweiz**
4. Fazit



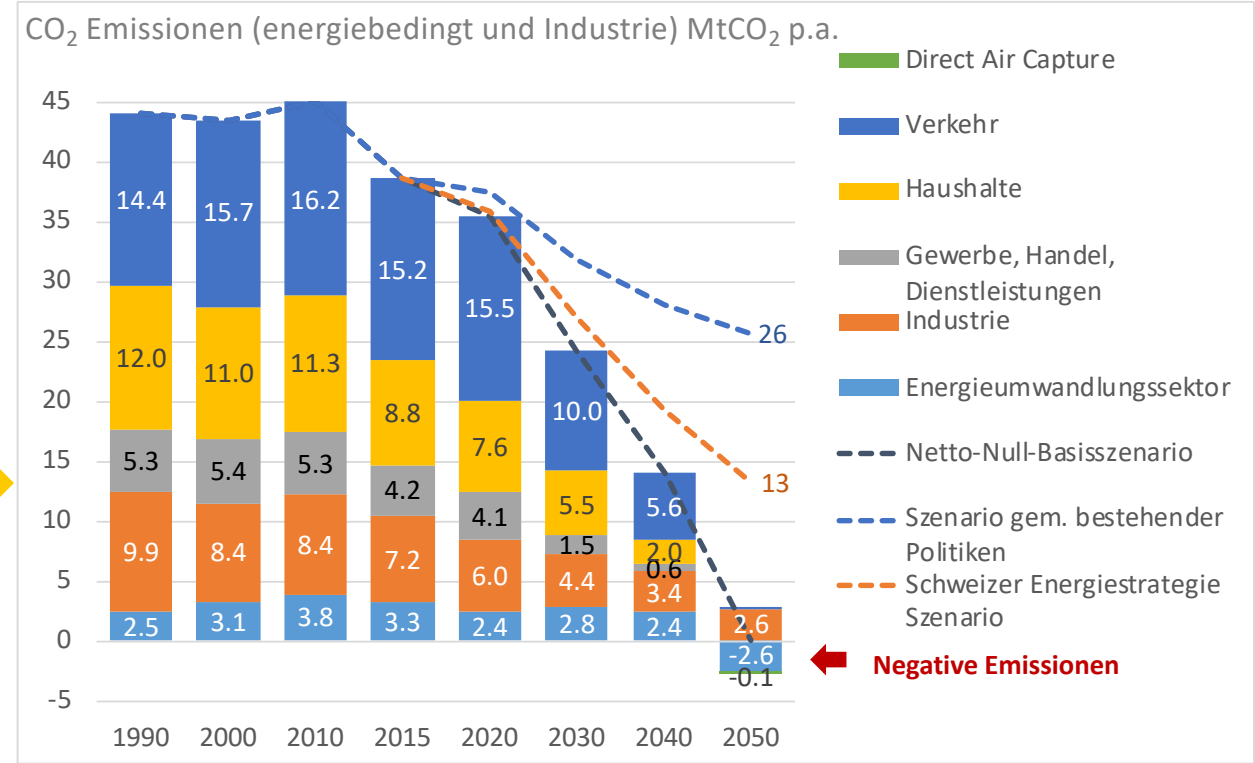
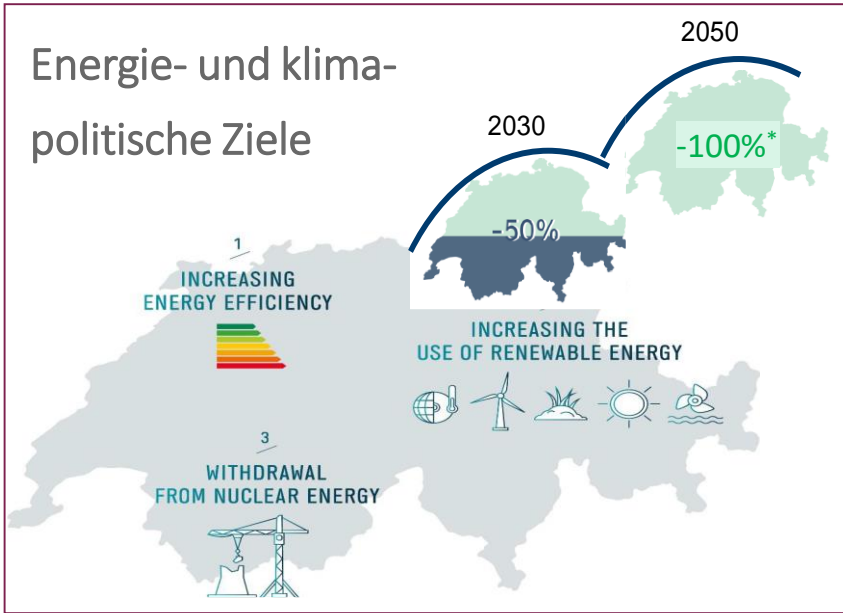
1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

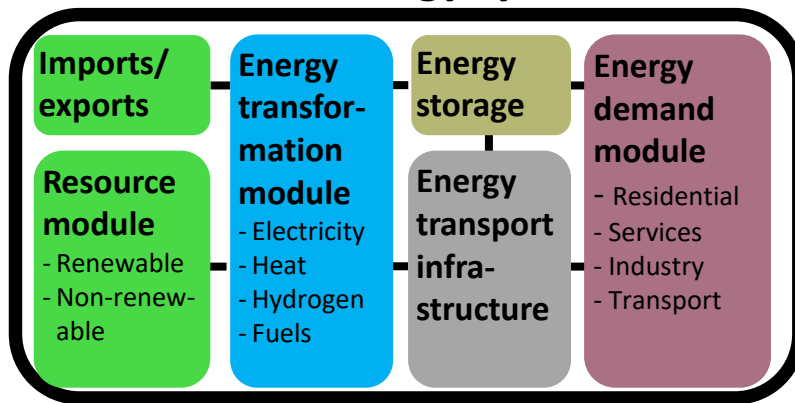
3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit





## Swiss TIMES Energy systems Model

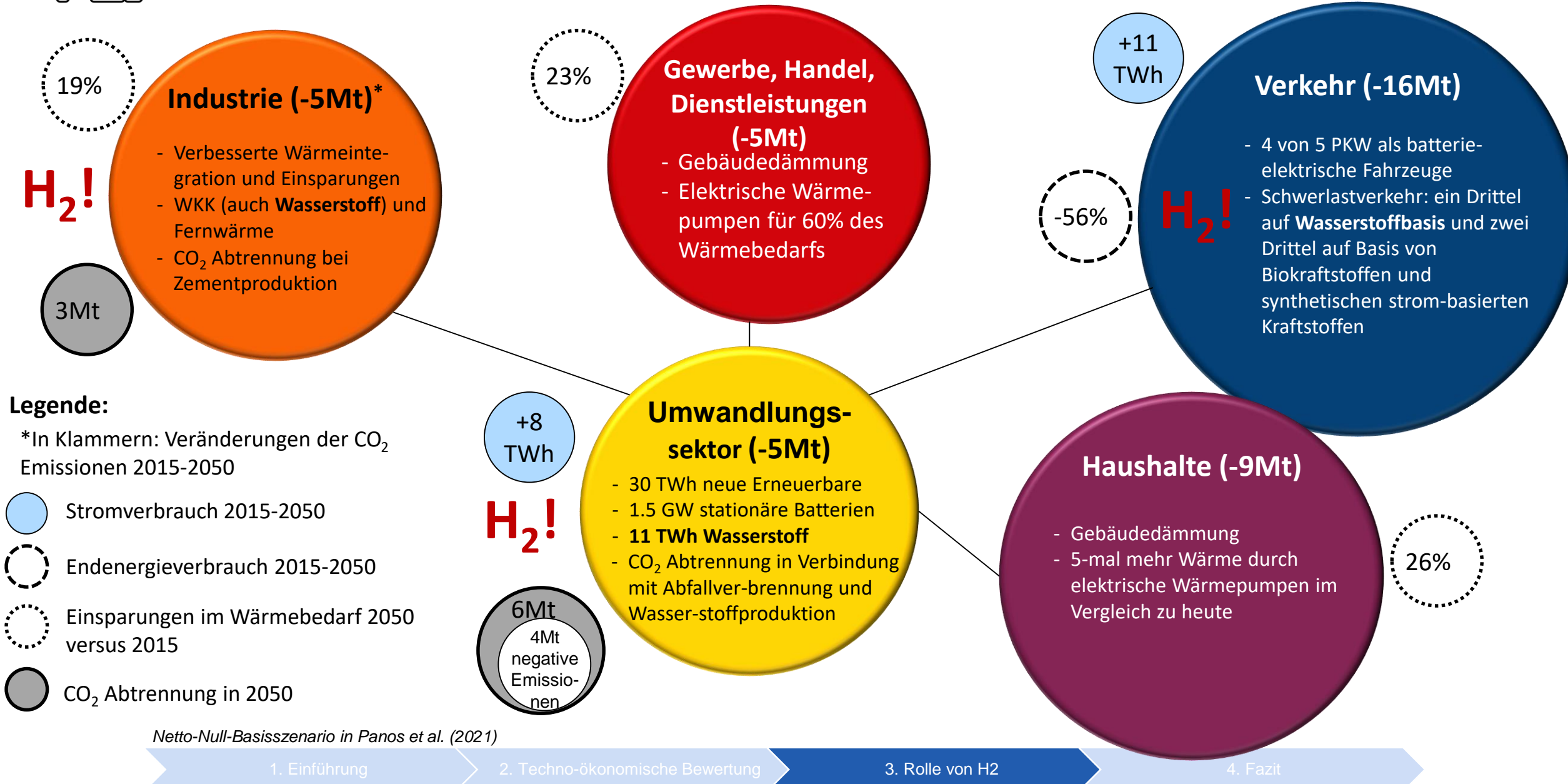


### Weitere Netto-Null-Szenariovarianten:

- **ANTI:** Begrenzte Potenziale für neue Energieträger und Importe
- **SECUR:** Versorgungssicherheit
- **MARKETS:** Forcierte Marktintegration
- **EFFORT:** Kostenoptimale Minderung über alle Sektoren
- **INNOV:** Beschleunigte Innovation

Panos, E., et al. (2021)



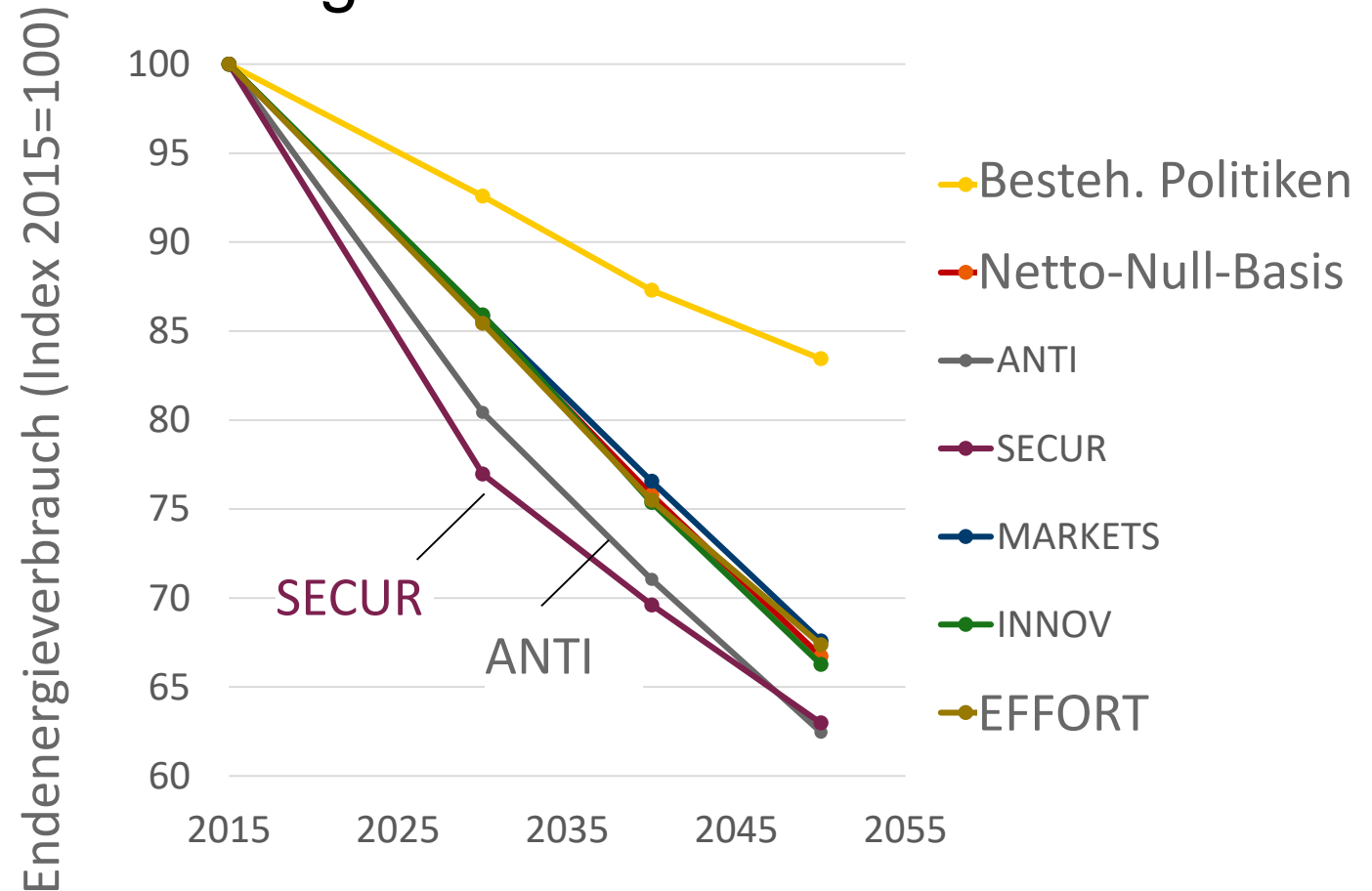


Netto-Null-Basisszenario in Panos et al. (2021)



# Steigerung der Energieeffizienz unabdingbar

- Langfristig 30-40% (bei Netto-Null) weniger Energie bei steigender Bevölkerung
- Endenergieverbrauch pro Kopf sinkt um 50% bis 2050
- Insbesondere mittelfristig stärkere Effizienzmassnahmen notwendig bei langsamerem Ausbau klimafreundlicher Technologien und bei Verringerung der Importabhängigkeit



Panos, E., et al. (2021)

1. Einführung

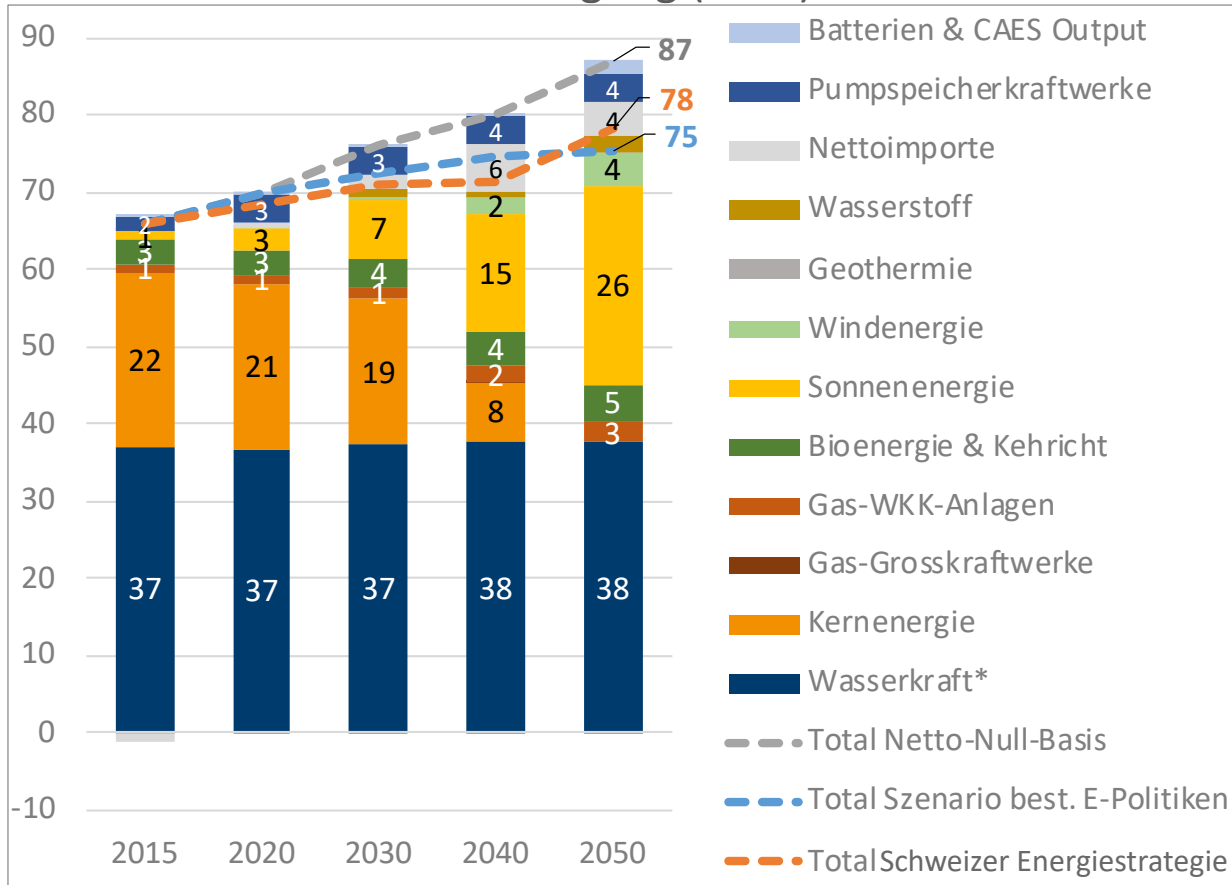
2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H2

4. Fazit

# Zunehmender Stromverbrauch bei signifikanter Veränderung der Erzeugungsstruktur

Stromerzeugung (TWh)



Netto-Null-Basiszenario in Panos et al. (2021)

- **Anstieg des Anteils der Elektrizität am Endenergieverbrauch** auf knapp 50% in 2050
- **Verlagerung der Erzeugung auf untere Netzebenen** bei Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke und gleichzeitigem Zubau von Solar PV
- **Langfristig CC(U)S** in Verbindung mit Kehrlichtverbrennung
- **Flexibilität durch Stromhandel** bei Vermeidung signifikanter Importabhängigkeiten
- **Systemflexibilität** durch steuerbare Wasserkraft, Batteriespeicher auf unteren Netzebenen und gesteuerte Nachfrage (Wärme, Mobilität)
- **Saisonale Speicherung** mittels Wasserstoff (nächste Folie)

1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

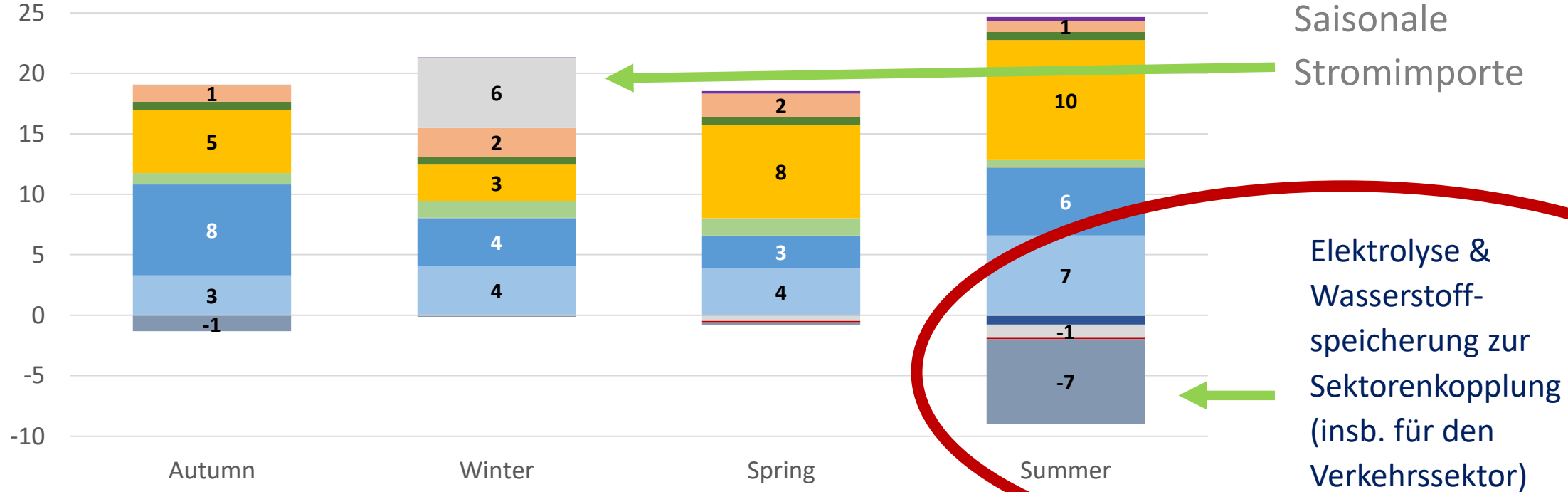
3. Rolle von H2

4. Fazit



# Saisonalität beim Strommix in 2050

Saisonale Strombilanz in 2050, TWh/yr.



Saisonale Stromimporte

Elektrolyse & Wasserstoffspeicherung zur Sektorenkopplung (insb. für den Verkehrssektor)

H<sub>2</sub>-Speicherung saisonal: 1.6 TWh<sub>H<sub>2</sub></sub>

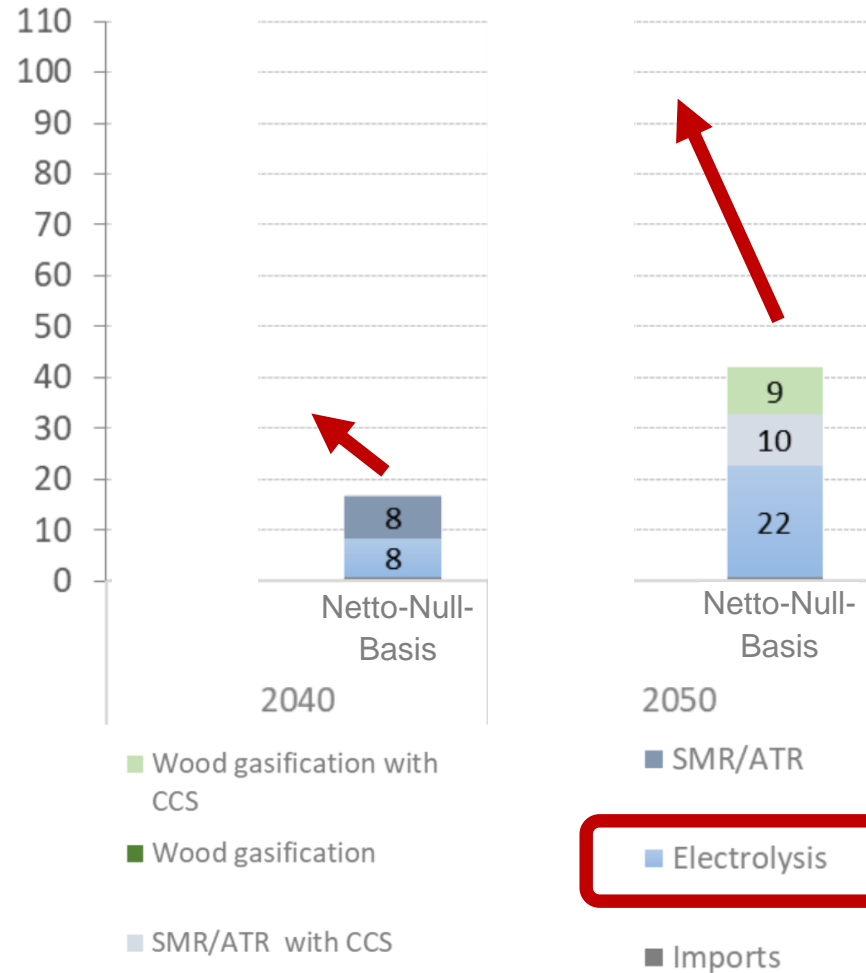
- Vehicle-to-grid
- WKK
- Geothermie
- Laufwasser
- Elektrolyseure
- Kehricht
- Gas-Grosskraftwerke
- Batterien/CAES
- Solar PV
- Pumpspeicher
- Speicherwasser
- Nettoimporte
- Windkraft

Netto-Null-Basiszenario in Panos et al. (2021)

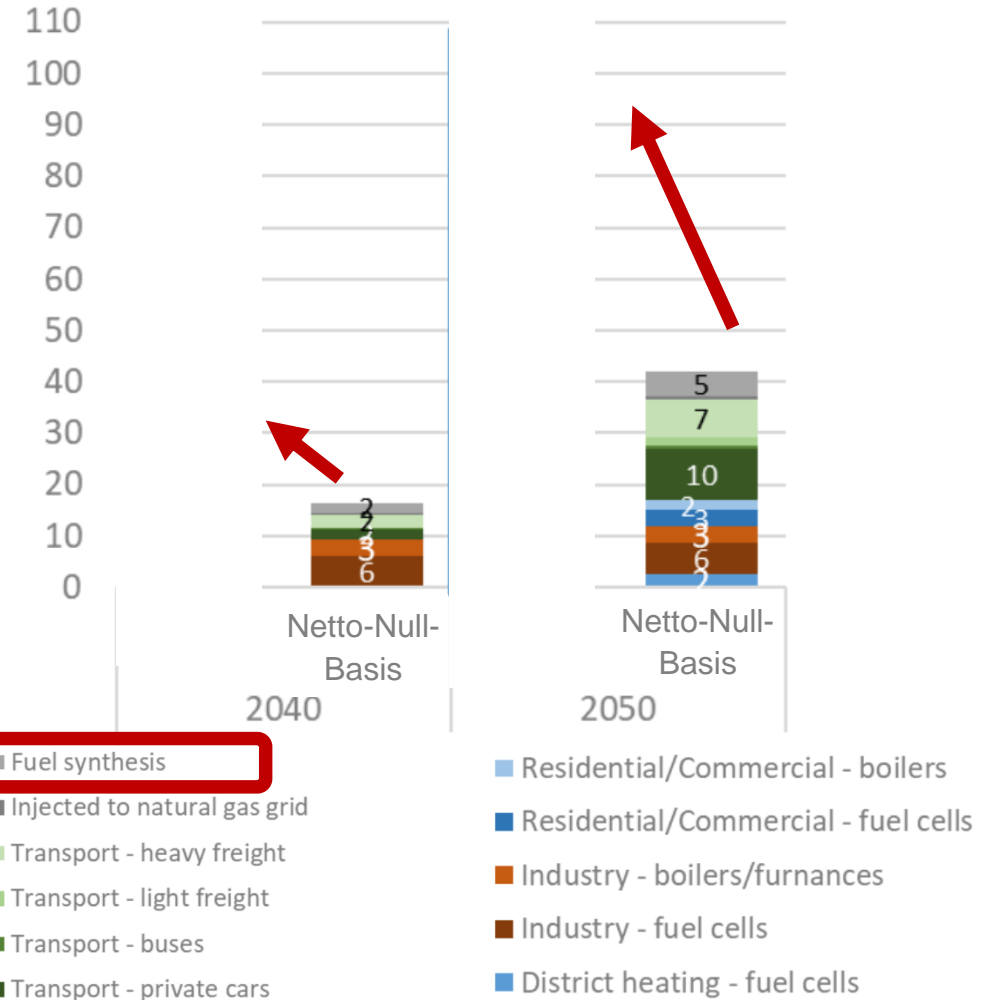


# Wasserstoff und e-fuels nötig, insbesondere wenn Versorgungssicherheit Priorität hat (Szenario SECUR)

Wasserstoffproduktion (PJ p.a.)



Wasserstoffverbrauch (PJ p.a.)



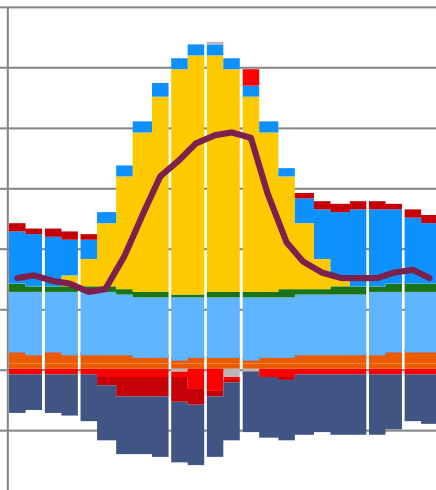
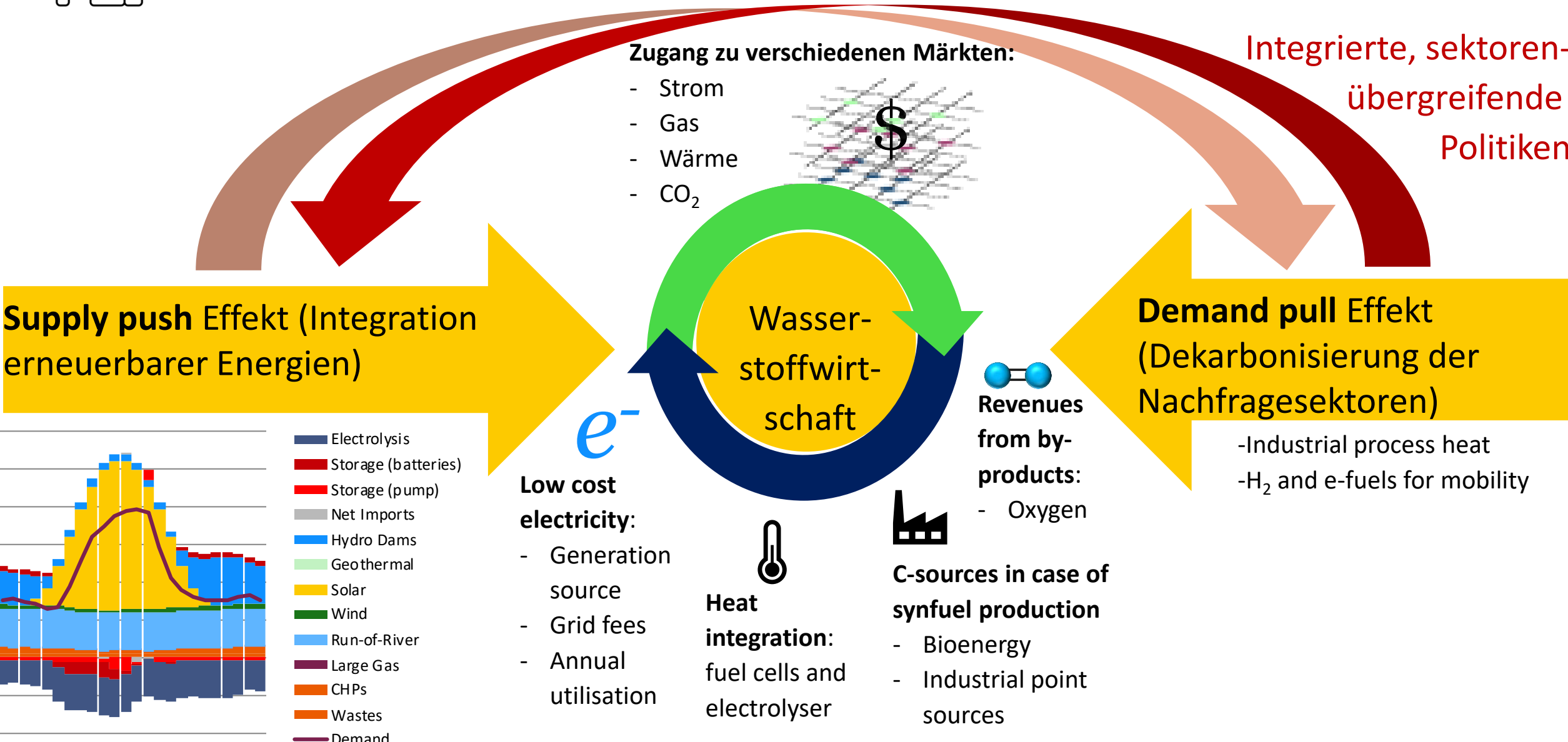
Panos, E., et al. (2021)

1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H2

4. Fazit



# Agenda

1. Einführung
2. Techno-ökonomische und ökologische Bewertung Wasserstoff
3. Die Rolle von Wasserstoff in einer Netto-Null Schweiz
- 4. Fazit**



1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit

- Politik und Entwicklungen:
  - Sehr ambitionierte energiepolitische europäischen Zielsetzungen für (grünen) Wasserstoff bis 2030
  - Fortschritt bisher in der EU und in der Schweiz sehr bescheiden
- Techno-ökonomische und ökologische Bewertungen:
  - Low-carbon Wasserstoff soll unter dem Schwellenwert von 36.4 gCO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub> liegen
  - Sehr unterschiedliche Umweltauswirkungen je nach Strom- (grün) und Fossilquelle (blau) und Supply Chain – wichtige Voraussetzungen für blauen Wasserstoff
  - Differenzierte Priorisierung der diversen Anwendungsbereiche («hard to abate»)
- Die Rolle von Wasserstoff im Netto-Null Energiesystem:
  - Netto-Null-Ziel technisch möglich, aber massive Hochskalierung umweltfreundlicher Technologien erforderlich
  - Elektrizität als Schlüssel in einem dekarbonisierten Energiesystem, aber auch weitere neue Energieträger notwendig
  - Wasserstoff vor allem für saisonale Speicherung und Anwendungen im Transportsektor sowie andere «hard to abate» Branchen
  - Starke Abhängigkeit von den Annahmen der Szenarien, sprich gesellschaftlicher Akzeptanz, europäischer Importe usw.
  - Emissionsminderung mehrheitlich mit heute verfügbaren Technologien möglich, aber Innovationsschub notwendig
  - Energiesystemintegration ist der Schlüssel für eine erfolgreiche Wasserstoffwirtschaft

1. Einführung

2. Techno-ökonomische Bewertung

3. Rolle von H<sub>2</sub>

4. Fazit



- Antonini, C., Treyer, K., Moioli, E., Bauer, C., Schildhauer, T. J. and Mazzotti, M. (2021) Hydrogen from wood gasification with CCS – a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel. *Sustainable Energy Fuels*. <https://doi.org/10.1039/D0SE01637C>
- Bauer, C., Treyer, K., Antonini, C., Bergerson, J., Gazzani, M., Gencer, E., Gibbins, J., Mazzotti, M., McCoy, S.T., McKenna, R., Pietzcker, R., Ravikumar, A.P., Romano, M.C., Ueckerdt, F., Vente, J., van der Spek, M. (2022) On the climate impacts of blue hydrogen production. *Sustainable Energy & Fuels*. <http://dx.doi.org/10.1039/D1SE01508G>
- Odenweller, A., Ueckerdt, F., Nemet, G., Jensterle, M., Luderer, G. (2022) Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply. *Nature Energy*. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01097-4>
- Panos E., T. Kober, R. Kannan and S. Hirschberg (2021). Long-term energy transformation pathways - Integrated scenario analysis with the Swiss TIMES energy systems model. SCCER JASM final report, Villigen PSI <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000509023>
- Panos E., Kannan R., Hirschberg S., Kober T., An assessment of energy system transformation pathways to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland, *Communications Earth & Environment*. 2023; 4(1): 157 (18 pp.). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00813-6>
- Pettersen J., Steeneveldt R., Grainger D., Scott T., Holst L.-M., Hamborg E. (2022) Blue hydrogen must be done properly. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.1232>
- Reigstad et al., 2022, Moving toward the low-carbon hydrogen economy: Experiences and key learnings from national case studies <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2022.100108>
- Riemer, M., Duscha, V. (2023) Carbon capture in blue hydrogen production is not where it is supposed to be – Evaluating the gap between practical experience and literature estimates. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121622>
- Tom Terlouw, Lorenzo Rosa, Christian Bauer, Russell McKenna, and Marco Mazzotti, Prospective hydrogen economies subject to environmental trade-offs and a production mismatch, in preparation, 2023.
- Sacchi, R., Becattini, V., Gabrielli, P. et al 2023. How to make climate-neutral aviation fly. *Nat Commun* 14, 3989 <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39749-y>
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A., Overall, J., Sacchi, R. and Luderer, G. (2021) Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
- Ueckerdt, F., Pfluger, B., Odenweller, A., Günther, C., Knodt, M., Kemmerzell, J. Rehfeldt, M., Bauer, C., Verpoort, P., Gils, H.C., Luderer, G. (2021) Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Wie die Politik Wasserstoffpfade hin zur Klimaneutralität 2045 finden kann. Ariadne-Kurzdossier, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgen-forschung (PIK), Potsdam, Germany. [https://ariadneprojekt.de/media/2021/11/Ariadne\\_Kurzdossier\\_Wasserstoff\\_November2021.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2021/11/Ariadne_Kurzdossier_Wasserstoff_November2021.pdf)



# Wir schaffen Wissen – heute für morgen

**Kontakt:**

[russell.mckenna@psi.ch](mailto:russell.mckenna@psi.ch)

<https://www.psi.ch/de/lea>

[rmckenna@ethz.ch](mailto:rmckenna@ethz.ch)

<https://esa.ethz.ch/>

